

多変量自己回帰モデルを用いた静止軌道上の 2MeV 電子フラックス一日平均値の予測

坂口歌織¹, 三好由純², 長妻努¹, 齊藤慎司¹, 関華奈子², 村田健史¹

[1]情報通信研究機構, [2]名古屋大学太陽地球環境研究所

放射線帯外帯を構成する高エネルギー電子フラックス(energetic electron flux: EEF)は、太陽活動の影響を受け桁単位で変動する。特に MeV エネルギー帯の EEF の量が極端に多くなると、深部帯電により地球を周回している人工衛星に障害をもたらす恐れがある。この EEF の変動を数日前に予測する手法として、私たちは多変量自己回帰モデルを開発し、その予測精度を線形モデル[Baker et al., 1990]と比較した。太陽風速度のみの一変量を入力としていた従来の線形モデルと異なり、自己回帰モデルは多変量(例えば、太陽風速度、惑星間空間磁場南北成分、太陽風動圧、EEF)の時系列データを入力として EEF の予測値を計算することが特徴である。両者の比較の結果、太陽風速度以外の変量をモデルに加えることで、予測精度は一変量の線形モデルより高くなることが分かった。今後は、この多変量自己回帰モデルをリアルタイムデータを入力データに用いたシステムとして実装することにより、より精度の高い EEF の予測値を提供できるようになると考えている。

1. はじめに

放射線帯外帯を構成する高エネルギー電子フラックスは(energetic electron flux: EEF)、太陽活動の影響を強く受け桁単位で大きく変動する。特に、静止軌道の MeV エネルギー帯の EEF の対数値は太陽風速度と正の相関があることが知られている [Pulikas and Blake, 1979]。この関係を利用して、Baker et al., [1990]は、静止軌道上の 2MeV 以上の EEF が線形予測フィルター(linear prediction filter: LPF)を用いて数日先まで予測できることを示した。しかし最近、太陽風速度以外にも EEF をコントロールしているパラメータがあることが報告されはじめた。例えば、高速太陽風と共に南北成分が負(南向き)の惑星間空間磁場が地球に到来した場合、EEF は通常より多く増加する傾向があることが報告されている[Miyoshi and Kataoka, 2008]。また太陽風動圧が強い場合、EEF は減少する傾向があり、磁気圏が圧縮されることによって粒子が磁気圏界面から消失することが要因だと解釈されている[Ohtani et al., 2009; Saito et al., 2010]。これらの太陽風速度とは独立なパラメータに対する EEF の依存性が、従来の太陽風速度のみを入力として与える線形予測フィルターの予測値の精度を劣化させていたと考えられる。そこで、本研究では予測精度を向上させるため、多変量を入力パラメータとして与えることができる予測モデルを新たに開発した。

2. 多変量自己回帰モデル

本研究で EEF を予測するために開発したモデルは、EEF と太陽風の時系列データを入力とする多変量自己回帰モデルである。自己回帰モデルとは、ある時系列 y_t を、その過去の観測値 y_{t-n} と白色雑音の線形和で表

現するモデルである。

$$y_t = \sum_{n=1}^m a_n y_{t-n} + v_t \quad (1)$$

ここで、 m は自己回帰の次数、 a_n は自己回帰係数である。また、 v_t は平均 0、分散 σ^2 の正規分布に従い過去の時系列 y_{t-n} とは独立な白色雑音である。

この自己回帰モデルの時系列を y_t を、 $\mathbf{Y}_t = (y_t(1), \dots, y_t(l))^T$ とすることで多変量自己回帰モデルとして時系列を表現することもできる。添字 T は転置行列を意味する。

$$\mathbf{Y}_t = \sum_{n=1}^m \mathbf{A}_n \mathbf{Y}_{t-n} + \mathbf{V}_t \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{A}_n は $a_n(i, j)$ を (i, j) 成分とする $l \times l$ 行列で自己回帰係数行列、 \mathbf{V}_t は l 次の白色雑音である。本研究では、変量として EEF と太陽風速度・動圧、惑星間空間磁場南北成分を用いている。*Baker et al.*, [1990] が用いた線形モデルは(2)式を太陽風速度と EEF の二変数で構成し、EEF の自己回帰係数を零に近似している。そのため EEF の予測は(3)式の $a_{1\dots m}(i, i)$ を零にした式で表現される。

$$y_t(i) = \sum_{n=1}^m (a_n(i, i)y_{t-n}(i) + a_n(i, j)y_{t-n}(j)) + v_t(i), \quad a_{1\dots m}(i, i) = 0 \quad (3)$$

ここで、 i は EEF、 j は太陽風速度を意味する。

3. 自己回帰係数の推定

式(2)の多変量自己回帰モデルを用いて EEF を予測するためにはまず、自己回帰係数行列 \mathbf{A}_n を推定する必要がある。本研究では、① EEF の対数値と太陽風速度の時系列データを用いた二変量モデルの係数と、② EEF の対数値と太陽風速度、惑星間空間磁場の Z 成分、太陽風動圧の対数値の四変量モデルの係数を求めた。係数の推定には Yule-Walker 方程式と Levinson's algorithm を用いた。モデルの評価基準としては、AIC(赤池情報量規準)を利用し、予測誤差分散が小さく、かつモデルとして合理的なパラメータ数(回帰の次数)を選択した [北川, 2005]。本研究で係数を推定のために用いたデータは、1999-2003 年(5 年間)の米国の静止軌道衛星 GOES10 が測定しているエネルギーが 2 MeV 以上の電子フラックス(Counts/cm²/sr/s)の対数値と、NASA/SPDF が提供している OMNI2 データセットの太陽風速度(km/s)、惑星間空間磁場南北成分(nT)、太陽風動圧(nPa)の対数値である。惑星間空間磁場の南北成分は GSM 座標系の Z 成分の値を用いた。全てのデータは、一日平均値の時系列として扱った。

4. 予測結果

上記で求めた自己回帰係数ベクトルおよび(2)式を用いて予測された EEF の値と、GOES10 が実際に観測した 2004 年 1 年間の 2 MeV 以上の EEF の観測値を図1に示す。上から、(a) 太陽風速度のみを入力とした線形予測、(b) EEF と太陽風速度を入力として①の回帰係数ベクトルを用いた回帰モデル予測、(c) EEF、太陽風速

度・動圧と惑星間空間磁場南北成分を入力として②の回帰係数ベクトルを用いた回帰モデル予測の結果である。赤線が一日前に予測された値、黒線が実際の観測値の一日(地球一周)平均値を示す。(a)の線形モデルは、EEF が変動するタイミングを予測することには概ね成功しているが、絶対値の予測精度は悪いことが分かる。特に、2MeV 以上の EEF が 10^5 (Counts/cm² sr s)を超えた、2004 年 210 日(第 23 活動周期で静止軌道の EEF が最大値を記録した夕事象)を予測できていないことは、宇宙天気予報の観点から問題である。それに比べて(b)の自己回帰モデルを用いた予測は、このような大きなフラックスの変化もほぼ完全に予測できている。ただし変動のピーク値は、観測値から大きく外れている箇所がいくつかある。(c)の四変量を入力に用いた自己回帰モデルでは、(b)では予測精度が悪かった変動のピーク値が改善されている。これは、惑星間空間磁場南北成分が負の値をもったときの EEF の増加、太陽風動圧が高いときの EEF の減少の効果が加味されたからだと考えられる。(c)は EEF が 10^5 (Counts/cm² sr s)を超えるタイミングとフラックスを一番良く予測している。

5. まとめ

放射線帯外帯を担うエネルギーが 2 MeV 以上の EEF の静止軌道上での変動を予測するために多変量自己回帰モデルを開発した。モデルに用いる自己回帰係数ベクトルは、1999 年から 2003 年(5 年間)の GOES10 で観測されたエネルギーが 2 MeV 以上の EEF と、OMNI2 データとして提供されている太陽風速度・動圧、惑星間空間磁場南北成分から推定した。Baker *et al.*, [1990]が用いた線形予測モデルと多変量自己回帰モデルによる予測結果を比べた結果、多変量自己回帰モデルの方がより精度よく EEF の変動の絶対値を予測していることが分かった。また自己回帰モデルの入力として、太陽風速度だけでなく惑星間空間磁場南北成分と太陽風動圧を用いることで精度はより高くなることも分かった。今後は、このモデルを、リアルタイムデータを入力としたシステムとして実装し、より精度の高い予測値を提供するシステムを開発する予定である。

謝辞

GOES10、OMNI2 データの提供元である NASA/GSFC, Space Physics Data Facility の CDAWeb に感謝します。

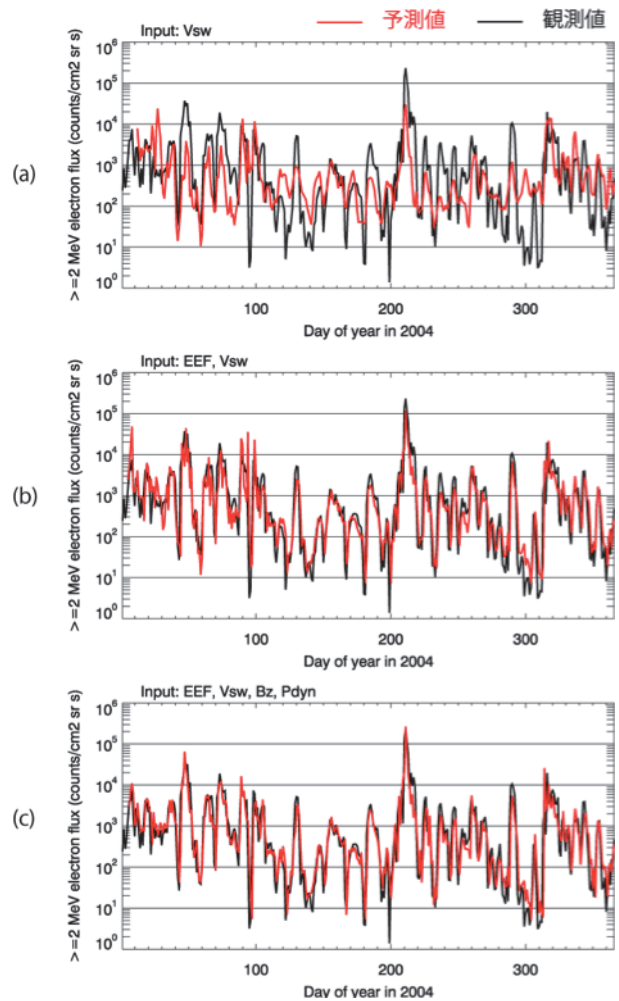


図1. 線形モデル・多変量自己回帰モデルを用いて予測した(赤線)EEF と実際の観測値(黒線)の比較。4 変量を入力パラメータとして扱った(c)が最も観測を精度よく予測している

参考文献

- Baker, D. N., R. L. McPherron, T. E. Cayton, and R. W. Klebesadel (1990), Linear Prediction Filter Analysis of Relativistic Electron Properties at 6.6 RE, *J. Geophys. Res.*, 95(A9), 15133-15140.
- 北川源四郎 (2005), 時系列解析入門, 岩波書店
- Miyoshi, Y., and R. Kataoka (2008), Flux enhancement of the outer radiation belt electrons after the arrival of stream interaction regions, *J. Geophys. Res.*, 113, A03S09, doi:10.1029/2007JA012506.
- Ohtani, S., Y. Miyoshi, H. J. Singer, and J. M. Weygand (2009), On the loss of relativistic electrons at geosynchronous altitude: Its dependence on magnetic configurations and external conditions, *J. Geophys. Res.*, 114, A01202, doi:10.1029/2008JA013391.
- Paulikas, G. A., and J. B. Blake (1979), Effects of the solar wind on magnetospheric dynamics: Energetic electrons at the synchronous orbit, in *Quantitative Modeling of Magnetospheric Processes*, edited by W. P. Olson, pp. 180–202, AGU, Washington, D. C.
- Saito, S., Y. Miyoshi, and K. Seki (2010), A split in the outer radiation belt by magnetopause shadowing: Test particle simulations, *J. Geophys. Res.*, 115, A08210, doi:10.1029/2009JA014738.